

УДК: 004.931;004.932

О качестве работы алгоритмов слежения за объектами на видео

Д. А. Вражнов^{1,a}, А. В. Шаповалов^{1,2,3,b}, В. В. Николаев²

¹ООО «Томсклаб», Россия, 634055, Томск, проспект Академический, 8/8

²Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 36

³Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 30

E-mail: ^avrazhnov@tomsklabs.com, ^bshpv@phys.tsu.ru

*Получено 14 февраля 2012 г.,
после доработки 4 мая 2012 г.*

Движение объекта на видео классифицируется на регулярное (движение объекта по непрерывной траектории) и нерегулярное (разрывы траекторий вследствие заслонения объекта слежения другими объектами, скачка объекта и др.). В случае регулярного движения объекта трекер рассматривается как динамическая система, что позволяет использовать условия существования, единственности и устойчивости решения такой системы как критерий корректной работы трекера. Предложен количественный критерий оценки корректной работы алгоритма слежения mean-shift, основанный на применении условия Липшица и других параметров трекера. Полученный результат обобщается на случай произвольного алгоритма слежения.

Ключевые слова: компьютерное зрение, трекинг, миншифт, динамические системы

On quality of object tracking algorithms

D. A. Vrazhnov¹, A. V. Shapovalov^{1,2,3}, V. V. Nikolaev²

¹Tomsklabs LLC, Akademicheskij av., 8/8, Tomsk, Russia, 634055

²Tomsk State University, Lenin av., 36, Tomsk, Russia, 634050

³Tomsk Polytechnic University, Lenin av., 30, Tomsk, Russia, 634050

Abstract. – Object movement on a video is classified on the regular (object movement on continuous trajectory) and non-regular (trajectory breaks due to object occlusions by other objects, object jumps and others). In the case of regular object movement a tracker is considered as a dynamical system that enables to use conditions of existence, uniqueness, and stability of the dynamical system solution. This condition is used as the correctness criterion of the tracking process. Also, quantitative criterion for correct mean-shift tracking assessment based on the Lipchitz condition is suggested. Results are generalized for arbitrary tracker.

Keywords: computer vision, tracking, mean-shift, dynamical systems

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 303–313 (Russian).

Работа выполнялась в ООО «Томсклаб» при частичной финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» ГК № П1789, П691.

Введение

Алгоритмы слежения (трекинга), оценивающие положения одного или нескольких целевых объектов (объектов слежения) на кадрах видеопоследовательности, входят в многочисленные приложения компьютерного зрения в робототехнике и видеонаблюдении.

Характеристики целевого объекта в реальном видео с течением времени, как правило, изменяются в силу естественных условий видеосъемки, когда, например, во время съемки изменяется освещенность объекта, изменяются относительные размеры объекта в последовательности кадров при удалении/приближении объекта относительно камеры, объект слежения заслоняется другими объектами и т. п. [Maggio et. al., 2011]. В этих условиях практическое применение известных алгоритмов трекинга, например, MS (mean-shift)–трекера, KLT (Kanade–Lucas–Tomasi)–трекера [Lucas et. al., 1981] и других приводит к стандартным ошибкам: смещение окна, выделяющего объект, относительно истинного положения объекта; полная потеря объекта трекером.

Обнаружение ошибок алгоритмов слежения позволяет скорректировать данные, на основе которых осуществляется трекинг, что повысит робастность системы видеонаблюдения (например, уменьшить количество ложных срабатываний).

В работе предложен критерий, позволяющий указать момент времени, в который работа трекера становится некорректной. Идея критерия – в представлении процесса слежения за объектом, как эволюции данного объекта, описываемой некоторой динамической системой. Следовательно, можем говорить об условиях существования и единственности решения этой системы. Апробация данного критерия проведена на экспериментальных данных и была показана его состоятельность.

Постановка задачи

Опишем кратко процесс слежения, т. е. работу трекера. Пусть имеется видео-поток v , представляющий собой последовательность кадров. Номер кадра в видеопоследовательности играет роль дискретного времени t . При помощи эксперта на первом кадре выделяется некоторый объект, который представляет интерес. Количественно объект описывается некоторым набором признаков $(x_i, i = 1, \dots, n)$, который формально записывается в виде вектора $z = (x_1, \dots, x_n) \in \Omega \subset \mathbb{R}^n$. Здесь \mathbb{R}^n играет роль пространства признаков объектов в видеопоследовательности. Признаками объекта могут быть координаты объекта в кадре (в этом случае $z = (x_1, x_2)$, $n = 2$), яркостные и цветовые характеристики (гистограммы яркости, и цветов RGB [Гонсалес, Вудс, 2005]), и др. В общем n - мерном случае слежение осуществляется в пространстве векторов– признаков $\Omega \subset \mathbb{R}^n$.

На следующем кадре при помощи итерационного алгоритма определяется положение, в которое переместился объект. Во многих алгоритмах трекинга новое положение объекта на данном кадре находится с помощью функций, позволяющих сравнивать характеристики различных областей, выделенных на кадрах, и находить область данного кадра с характеристиками, максимально схожими с характером. Эволюция объекта в видеопоследовательности описывается изменением характеристик объекта, $z(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))$. Трекер можно рассматривать как алгоритм, осуществляющий отображение $\varphi: \Omega \rightarrow \Omega$, связывающее положения объекта в пространстве признаков в различные моменты: $z(t+1) = \varphi(z(t))$. Эволюционная переменная t в видеопоследовательности имеет смысл номера кадра. Обозначим z_0 – положение объекта в начальный момент $t = 0$, а положение объекта в момент t , полученное с помощью трекера φ , через $z(t, z_0) = \varphi(t, z_0)$.

Представим математическую модель трекера как динамическую систему. В этом случае переменная t изменяется непрерывно на некотором временном отрезке, $t \in [0, T]$. В предполо-

жении, что объекты эволюционируют независимо друг от друга, запишем динамическую систему, описывающую слежение за объектом, в виде

$$z(t) = f(t, z(t)), \quad (1)$$

где функции $f(t, z) = (f_1(t, z), \dots, f_n(t, z))$ определены и непрерывно дифференцируемы в области $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, точкой обозначена производная $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ по t .

Существование и единственность решения $z(t, z_0)$ задачи Коши для динамической системы (1) с некоторым заданным начальным условием

$$z(t)|_{t=0} = z_0 \quad (2)$$

определяется известными условиями [Чезари, 1964; Петровский, 1984], в их число входит условие Липшица, которое можно записать в виде

$$|f_i(t, z) - f_i(t, z')| \leq N \sum_{j=1}^n |x_j - x_j'|, \quad z = (x_1, \dots, x_n), \quad i = 1, \dots, n,$$

где N – константа Липшица. Выражение $\rho(z, z') = \sum_{i=1}^n |x_i - x_i'|$ имеет смысл расстояния (метрики) в пространстве $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ векторов – признаков объектов z . Тогда условие Липшица запишется в виде

$$\rho(f(t, z), f(t, z')) \leq nN \rho(z, z'). \quad (3)$$

В данной работе в качестве метрик использовались расстояния Бхаттачария [Bhattacharyya, 1943] и Евклида.

Константа Липшица для модели трекера

Динамическая система задается функциями $f(t, z)$, а трекер – отображением φ .

Будем считать динамическую систему (1) математической моделью трекета, т. е. эволюционная переменная t изменяется непрерывно, а решение динамической системы $z(t, z_0)$ описывает процесс трекинга, $z(t, z_0) = \varphi(t, z_0)$, z_0 – положение объекта слежения в начальный момент $t = 0$.

Следует подчеркнуть, что представление трекера как динамической системы и, соответственно, получение критерия корректной работы трекера на основе условий существования решения задачи Коши (1), (2) для динамической системы носят, скорее, эвристический характер. Состоятельность критерия обосновывается экспериментально.

Для трекера функции $f(t, z)$ неизвестны. Чтобы воспользоваться условиями существования и единственности решения задачи Коши (1), (2) для трекера, необходимо переписать соответствующим образом условие Липшица.

Поскольку для трекера считаем известной $z(t) = z(t, z_0) = \varphi(t, z_0)$, функции $f(t, z)$ определим выражением

$$f(t, z(t)) = \frac{\partial z(t)}{\partial t} \approx \frac{z(t + \Delta t) - z(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta z(t)}{\Delta t},$$

сдвигом по видеопоследовательности изменяем момент t , выбор Δt соответствует выбору интервалов между кадрами, по которым вычисляется смещение $\Delta z(t)$, $z(t)$ и $z'(t)$ – характеристики областей, выделенных на кадре в момент t .

Условием существования и единственности решения задачи Коши (1), (2) для динамической системы (1) является условие сжатия оператора A ,

$$\varphi(z(t)) := Az(t) = z_0 + \int_0^t f(\tau, z(\tau)) d\tau, \quad (6)$$

относительно метрики в пространстве векторных функций $z(t)$ [Чезари, 1964],

$$\rho(z, z') = \sum_{i=1}^n \max_{t \in [0, T]} |x_i(t) - x'_i(t)|, \quad (7)$$

где $z(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))$, $z'(t) = (x'_1(t), \dots, x'_n(t))$.

Условие сжатия оператора A [Чезари, 1964; Петровский, 1984]:

$$\rho(Az, Az') \leq \alpha \rho(z, z'), \quad \alpha < 1, \quad (8)$$

где α – коэффициент сжатия.

Сжимающий в соответствии с (8) оператор A определяет единственное решение задачи (1), (2) на отрезке $[0, t]$ как неподвижную точку оператора A . Для трекера это означает, что вектор, $z(t) = z(t, z_0) = \varphi(t, z_0)$, характеризующий объектов момент $t > 0$, существует, пока выполняется условие сжатия, т. е. положение $z(t)$ объекта на кадрах с номерами $t > 0$ будет отмечено корректно (будет соответствовать критерию эксперта).

Условие сжатия для оператора A имеет вид

$$\alpha = nNh < 1, \quad (9)$$

где N – константа Липшица для $f(t, z)$, h – шаг по времени, с которым строится решение $z(t) = z(t, z_0) = \varphi(t, z_0)$. Для слежения за объектом в видеопоследовательности ($n = 2$) условие сжатия (9) имеет вид

$$\alpha = 2Nh < 1.$$

При выполнении условия Липшица для существования решения нужно выбрать достаточно мелкий шаг h по времени. Неравенство (9) можно принять в качестве условия корректной работы трекера. Понимать его следует так: а) найти на нужном временном интервале константу Липшица N , б) выбрать шаг h по времени для трекера из условия ($n = 2$)

$$h < \frac{1}{2N}. \quad (10)$$

Для дискретного времени t и трекера φ аналог оператора A выберем в виде:

$$Az(t) = z_0 + \sum_{k=0}^{k=t} \Delta z(k). \quad (11)$$

Применение алгоритма Mean-shift для слежения

В настоящее время разработаны различные алгоритмы слежения, являющиеся модификациями алгоритмов Mean-Shift, фильтра Калмана, фильтра частиц [Comaniciu et al., 2003; Maggio et al., 2011]. Одной из основных проблем применения данных алгоритмов на практике является потеря трекером объекта: после того как объект выходит из кадра или заходит за некоторое препятствие, трекер продолжает следить, но уже не за первоначальным объектом, а за некоторой областью на кадре, не являющейся объектом. Чтобы контролировать эти эффекты, необхо-

димы критерии корректной работы трекера. Данная проблема решалась наложением искусственных ограничений в виде маски области слежения и границ изменения характеристик объекта, таких как геометрические размеры, форма, цвет и др.

Математической моделью объекта на кадре видеоряда, как отмечено выше, служит характеристический вектор, вычисленный для участка изображения, содержащего объект (например, цветовая гистограмма) [Szelisky, 2010]. В работе движение объекта классифицируется на регулярное (движение объекта по непрерывной траектории) и нерегулярное (разрывы траекторий вследствие заслонения объекта слежения другими объектами, скачка объекта и др.). В случае регулярного движения объекта трекер рассматривается как динамическая система, что позволяет использовать условия существования, единственности и устойчивости решения такой системы, как критерий корректной работы трекера.

Для того чтобы начать следить за объектом, необходимо указать его первоначальное положение, тем самым задать модель объекта [Comaniciu et al., 2003]. Как описано выше, существует множество различных способов выделения объекта. Для данного подхода воспользуемся экспертным выделением области эллиптической формы, в которой находится объект. В процессе трекинга мы будем следить за центром эллипса [Collins, 2003].

Пусть $\{\xi_k\}_{k=1,\dots,r}$ – координаты пикселей в эллиптической области, выделяющей объект. Координаты центра эллипса совпадают с координатами центра объекта на предыдущем кадре.

В качестве вектора признаков объекта выберем цветовую гистограмму объекта слежения, которую, согласно [Гонсалес, Вудс, 2005], запишем в виде

$$q_u = C \sum_{l=1}^r k(\|\xi_l\|^2) \delta[b(\xi_l) - u], \quad u = 1, \dots, m.$$

Здесь функция $b(\xi_l)$ номер ячейки цветовой гистограммы, отвечающей цвету пикселя с координатами ξ_l ; δ – дельта-символ Кронекера; $k(\|\xi_l\|^2)$ – ядро, при помощи которого меньшие веса присваиваются пикселям наиболее отдаленным от центра [Comaniciu et al., 2003], $\|\xi_l\|$ – евклидова норма вектора ξ_l . Определим ядро $K(\xi_l)$ как вещественную функцию, заданную на неотрицательной вещественной полуоси, такую что $K(\xi_l) = k(\|\xi_l\|^2)$. Нормировочный множитель

$C = \frac{1}{\sum_{l=1}^r k(\|\xi_l\|^2)}$ получается из условия $\sum_u q_u = 1$.

В процессе слежения предполагается, что на текущем кадре требуется определить положение объекта по известному положению на предыдущем кадре. На текущем кадре выделяется область возможного положения объекта (кандидат объекта), которая затем уточняется.

Пусть $\{\xi_l\}_{l=1,\dots,r}$ – положения пикселей кандидата объекта, тогда, следуя [Comaniciu et al., 2003], гистограмма кандидата вычисляется по формуле

$$\hat{p}_u(y) = C_h \sum_{l=1}^r k\left(\left\|\frac{y - \xi_l}{h}\right\|^2\right) \delta[b(\xi_l) - u], \quad u = 1, \dots, r,$$

где C_h – нормировочная константа, h – размер окна, использованный при построении гистограммы [Comaniciu et al., 2003].

Меру различия между гистограммами будем вычислить по формуле, предложенной Бхаттачария [Bhattacharya, 1943]:

$$\rho[p(y), q] = \sum_{u=1}^r \sqrt{p_u(y)q_u},$$

где u – номер ячейки гистограммы.

В работе [Comaniciu et al., 2000] предложена формула вычисления расстояния между гистограммами на основе формулы Бхаттачария:

$$d[p(y), q] = \sqrt{1 - \rho[p(y), q]} = \sqrt{1 - \sum_{u=1}^r \sqrt{p_u(y)q_u}}.$$

Замечание: уменьшение расстояния эквивалентно увеличению ρ .

Рассмотрим функцию $\rho[p(y), q]$, зависящую от координаты y центра окна, в котором вычисляется гистограмма $p(y)$ кандидата объекта. Разложим эту функцию в ряд Тейлора в окрестности точки $p(\tilde{y}_0)$:

$$\begin{aligned} \rho[\hat{p}_u(y), q] &= \frac{1}{2} \sum_{u=1}^r \sqrt{\hat{p}_u(\tilde{y}_0)\hat{q}_u} + \frac{1}{2} \sum_{u=1}^r \hat{p}_u(y) \sqrt{\frac{\hat{q}_u}{\hat{p}_u(\tilde{y}_0)}} \approx \frac{1}{2} \sum_{u=1}^r \sqrt{\hat{p}_u(\tilde{y}_0)\hat{q}_u} + \\ &+ \frac{C_h}{2} \sum_{l=1}^r w_l k \left(\left\| \frac{y - \xi_l}{h} \right\|^2 \right), \end{aligned}$$

где

$$w_l = \sum_{u=1}^r \sqrt{\frac{\hat{q}_u}{\hat{p}_u(\tilde{y}_0)}} \delta[b(\xi_l) - u]. \quad (12)$$

Для максимизации $\rho[\hat{p}_u(y), q]$ необходимо максимизировать второй член в (12), варьируя y . Данная величина является оценкой распределения плотности вероятности отличия гистограммы объекта и гистограммы кандидата в точке y с ядром $k \left(\left\| \frac{y - \xi_l}{h} \right\|^2 \right)$ для данных, взвешенных при помощи w_l . Моду данной функции распределения плотности вероятности можно найти при помощи процедуры MeanShift. В данной процедуре эллиптическая область кандидата объекта рекурсивно перемещается из начального положения кандидата объекта $y_0 = \tilde{y}_0$ в новое положение по формуле

$$y_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \xi_i w_i g \left(\left\| \frac{y_0 - \xi_i}{h} \right\| \right)}{\sum_{i=1}^n w_i g \left(\left\| \frac{y_0 - \xi_i}{h} \right\| \right)}, \quad (13)$$

где $g(x) = -k'(x)$ при условии, что производная $k'(x)$ ядра $k(x)$ существует для всех $x \in [0, \infty)$, за исключением множества меры нуль.

Алгоритм слежения

Пусть объект характеризуется гистограммой $\{q_u\}_{u=1, \dots, r}$; его положение на предыдущем кадре \tilde{y}_0 .

1. Для нахождения объекта на текущем кадре вычисляется мера различия между гистограммой кандидата объекта $p(y_0)$ и гистограммой объекта q $\rho[p(y_0), q] = \sum_{u=1}^r \sqrt{p_u(y_0)q_u}$.

2. Вычисляем вес w_l согласно (12).

3. По формуле (13) находим новое положение y_1 для кандидата объекта.
4. Вычисляем гистограмму $\{p_u(y_1)\}_{u=1,\dots,r}$ окна для нового положения объекта и оцениваем схожесть гистограмм нового кандидата объекта и объекта по формуле

$$\rho[p(y_1), q] = \sum_{u=1}^r \sqrt{p_u(y_1) \cdot q_u}.$$

5. Пока $\rho[p(y_1), q] < \rho[p(y_0), q]$, делаем итерации $y_1 = \frac{y_0 + y_1}{2}$. Далее вычисляем $\rho[p(y_1), q]$.
6. Если $\|y_1 - y_0\| < \varepsilon$, останавливаемся, в противном случае $y_0 = y_1$, и возвращаемся к шагу 2.

В качестве ядра k рекомендуется использовать ядро Епанечникова [Comaniciu et al., 2003], поскольку производная ядра $g(x)$ будет постоянной и формула (10) принимает вид

$$\tilde{y}_1 = \frac{\sum_{l=1}^n y_l w_l}{\sum_{l=1}^n w_l}. \quad (14)$$

Расчет аналога константы Липшица для дискретной динамической системы производился с учетом изменения таких параметров как радиус области вокруг объекта, время, цветовая модель, по формуле

$$N = \max_{a,b} \frac{\|f(a) - f(b)\|}{\|a - b\|},$$

где a – двумерный вектор, характеризующий положение центра объекта на некотором кадре; $f(a)$ – вектор центра объекта на следующем кадре. Под нормой понимается расстояние Евклида.

Ниже приведены результаты тестов процессов слежения за объектами на двух видеорядах с использованием цветных гистограмм в пространствах RGB и HSV. Рисунки 1–5 относятся к первому видеоряду, рисунки 6–8 – ко второму.

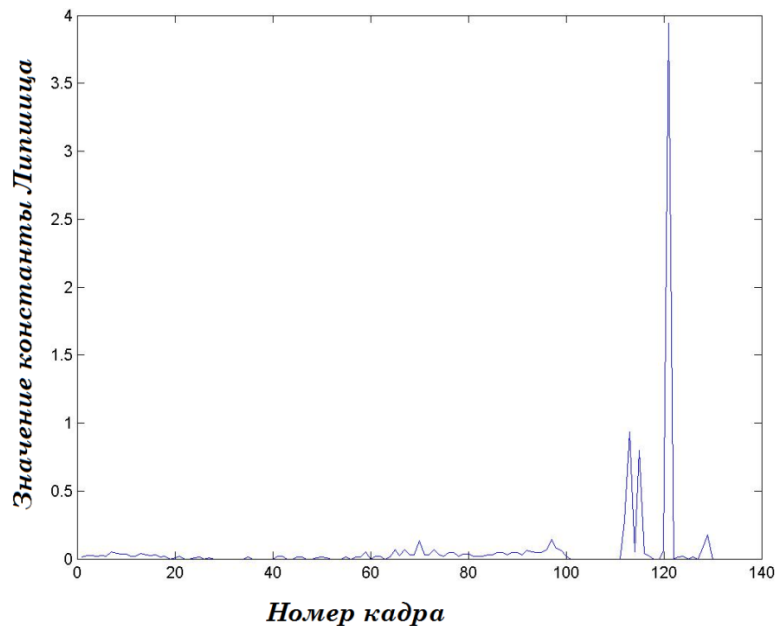


Рис. 1. Зависимость константы Липшица от номера кадра с использованием RGB-гистограмм

Зависимости константы Липшица N от номера кадра (времени) для первого видеоряда приведены на рисунках 1–2.

На рисунке 3 показан процесс слежения за объектом, выделенным красным прямоугольником, на первом видеоряде.

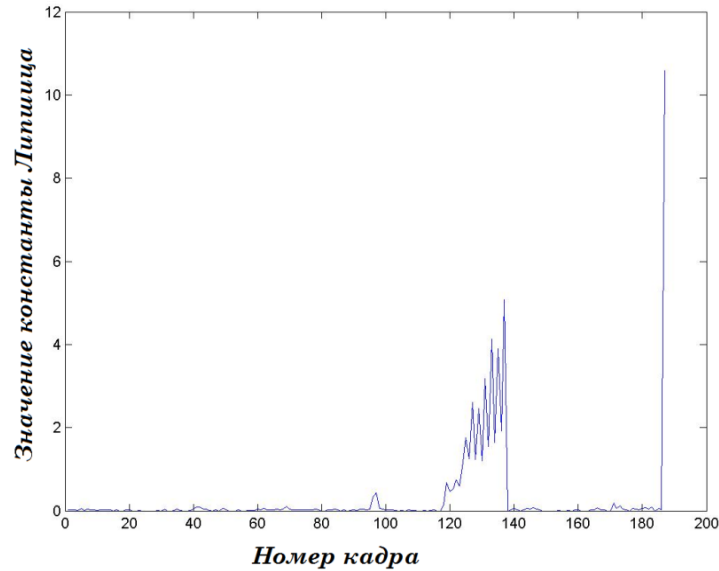
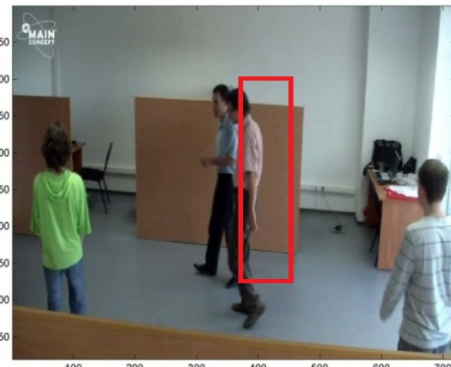


Рис. 2. Зависимость константы Липшица от номера кадра с использованием HSV-гистограмм

Кадр 119



Кадр 120



(а)

Кадр 123



Кадр 124



(б)

Рис. 3. Кадры из 1-го видеоряда в различные моменты времени

При переходе с кадра 119 на кадр 120 объект теряется (рис. 3а), что соответствует поведению константы Липшица на рисунке 1.

На рисунке 3б слежение проводится с использованием HSV-гистограмм. Из рисунка видно, что потеря объекта происходит при переходе с кадра 123 на кадр 124, т. е. позже по сравнению с рисунком 3а, что соответствует поведению константы Липшица на рисунке 2.

На рисунке 3а (кадры 119–120) приведен результат слежения за объектом с использованием RGB-гистограмм, а на рисунке 3б (кадры 123–124) – с использованием HSV-гистограмм.

Зависимости константы Липшица от параметра сдвига приведены на рисунках 4 и 5. Из рисунков видно, что константа Липшица незначительно изменяется при изменении параметра сдвига от 5 до 40 (пикселей) и возрастает скачком при некотором пороговом значении (на рисунках 4, 5 порог приблизительно равен 42). Очевидно, что при превышении порогового значения параметра сдвига, рассматриваемый алгоритм неприменим.

На рисунках 6–7 приведены зависимости константы Липшица от номера кадра для второго видеоряда с использованием RGB- и HSV-гистограмм соответственно.

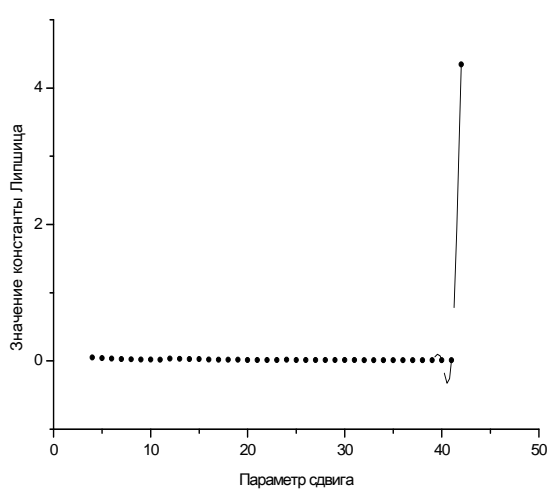


Рис. 4. Зависимость константы Липшица от параметра сдвига для случая RGB-гистограмм

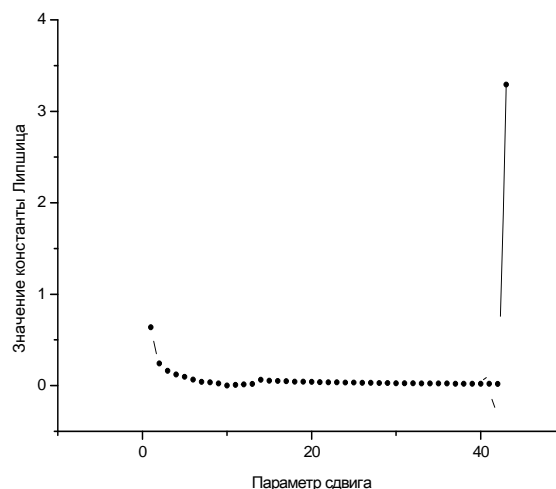


Рис. 5. Зависимость константы Липшица от параметра сдвига для случая HSV-гистограмм

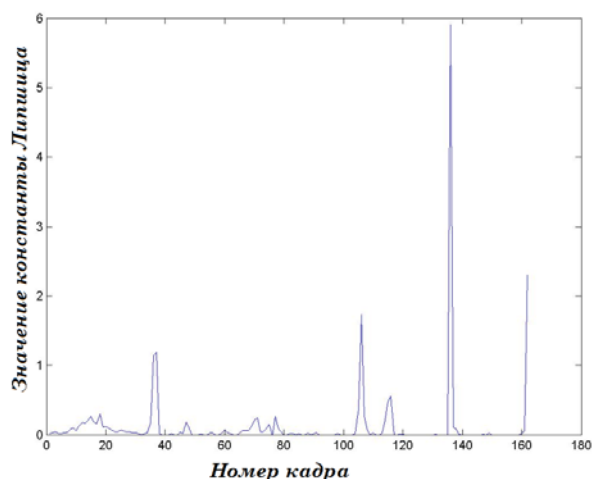


Рис. 6. Зависимость константы Липшица от номера кадра для случая RGB-гистограмм

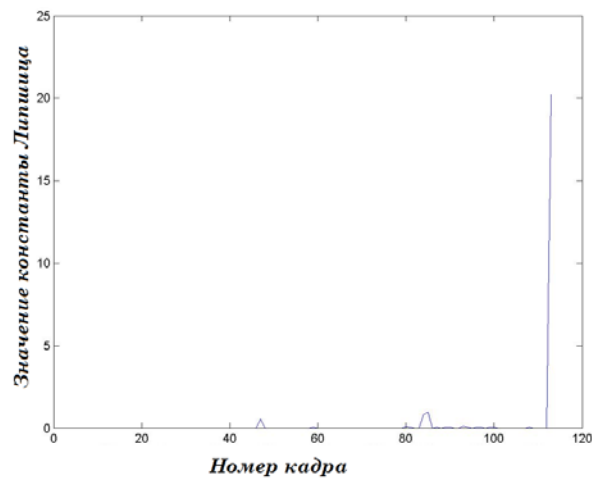


Рис. 7. Зависимость константы Липшица от номера кадра для случая HSV-гистограмм

На рисунке 8 приведен результат теста слежения за объектом (в красном прямоугольнике) на втором видеоряде.

Рисунок 8а соответствует слежению за объектом с использованием RGB-гистограмм. Рисунок 8б соответствует слежению за объектом с использованием HSV-гистограмм.

Из рисунка 8а видно, что при переходе с кадра 37 на кадр 38 объект теряется, что соответствует поведению константы Липшица на рисунке 6. Аналогично, при переходе с кадра 110 на 111 (рис. 8б) потеря объекта соответствует зависимости константы Липшица, приведенной на рисунке 7.

В заключение отметим: проведенные эксперименты показывают, что надежность работы трекера на основе представления трекера как динамической системы можно характеризовать аналогом константы Липшица для дискретной системы. Это позволяет указать моменты времени и пространственное положение объекта слежения, при которых возникает ошибка (несогласованность результатов работы алгоритма с оценкой эксперта). В дальнейшем мы планируем сравнить различные критерии контроля качества трекинга (алгоритм вперед–назад, условие Ляпунова). Особенности критерия (он работает в принципе, есть особенности, когда он хорошо работает, а есть, когда – нет). Следовательно, нужно провести сравнение критериев для различных алгоритмов трекинга.

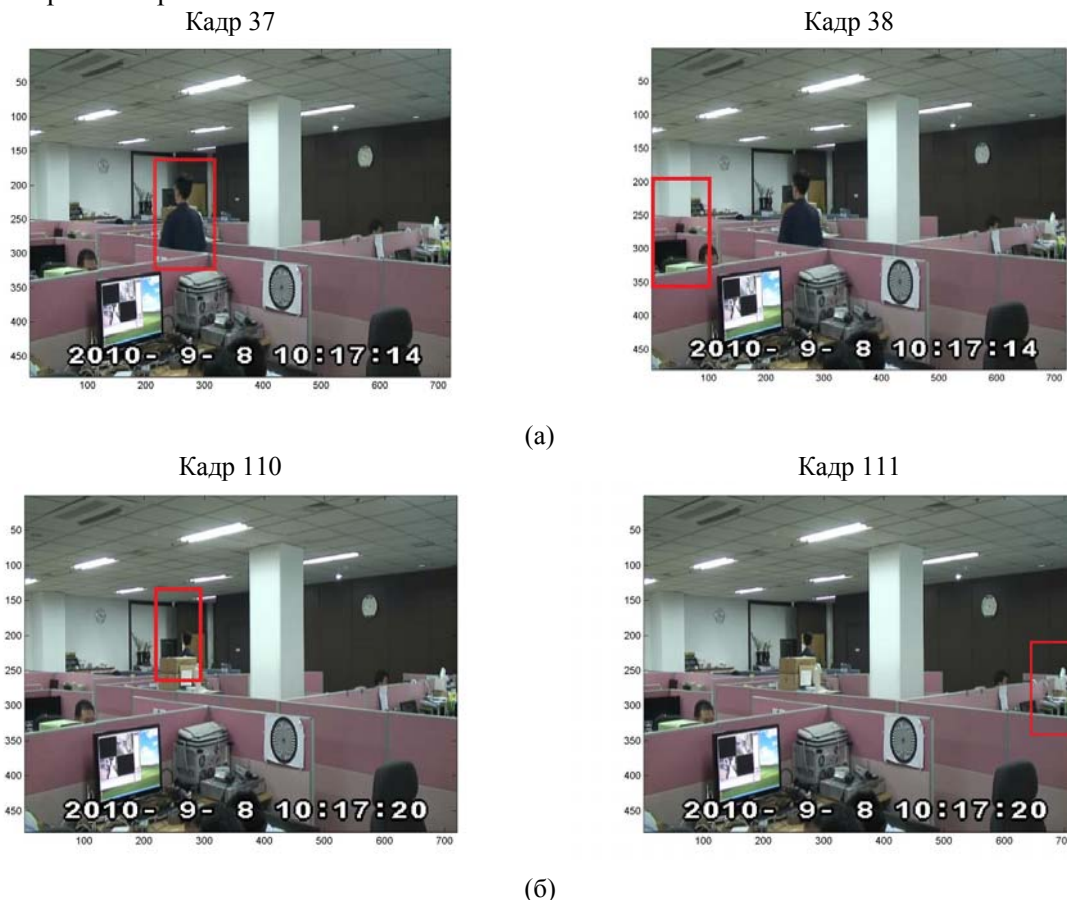


Рис. 8. Кадры из 2-го видеоряда в различные моменты времени

Список литературы

- Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – Техносфера, 2005. – 1072 с.
- Петровский И. Г. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений. – Изд. 7-е, испр. и доп. Изд-во МГУ, 1984. – 295 с.
- Чезари Л. Асимптотическое поведение и устойчивость решений обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Мир, 1964. – 477 с.
- Bhattacharyya A. On a measure of divergence between two statistical populations defined by their probability distributions// Bulletin of the Calcutta Mathematical Society 35: 99–109. MR0010358, 1943.

-
- Collins R.* Mean-shift Blob Tracking through Scale Space // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'03), June 2003.
- Comaniciu D., Ramesh V., Meer P.* Kernel-based object tracking // IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, vol. 25, № 5, may 2003.
- Comaniciu D., Ramesh V., Meer P.* Real-Time Tracking of Non-Rigid Objects using Mean Shift // IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'00), Hilton Head Island, South Carolina. Vol. 2, pp. 142–149, 2000.
- Lucas B., Kanade T.* An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision // International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 674–679, 1981.
- Maggio E., Cavallaro A.* Video tracking theory and practice. – Wiley, 2011.
- Szelisky R.* Computervision: algorithm sandapplication. – Springer, 2010.